

УРАВНЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ БЕСЩЕТОЧНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С КАСКАДНЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

В настоящее время системы самовозбуждения с фазовым компаундированием и полупроводниковыми выпрямителями широко применяются для синхронных генераторов и двигателей. Поэтому вопросам исследования статических и переходных режимов систем возбуждения с выпрямителями уделяется большое внимание [1—3].

Для каскадного асинхронно-синхронного возбудителя в системе бесщеточного возбуждения синхронных машин уравнения для статического режима рассмотрены в [4]. В данной работе приводятся уравнения для исследования динамических режимов работы каскадного возбудителя.

Рассмотрим возбудитель как идеализированную электрическую машину, для которой справедливы обычные допущения [5, 6]: потоко-сцепления обмоток — линейные функции всех токов, потери в стали отсутствуют, распределение намагничивающих сил в пространстве синусоидально, зазор равномерен, индуктивности статорных и роторных обмоток постоянны, а взаимные индуктивности обмоток статора и ротора изменяются по синусоидальному закону, фазные обмотки симметричны, т. е. имеют одинаковые числа витков, активные сопротивления и взаимные сдвиги магнитных осей. Совмещенную обмотку статора возбудителя можно рассматривать как трехфазную обмотку с симметричными 3-фазными приложенными напряжениями [7] для момента времени, когда ток $i_a = 1$, $i_b = i_c = -\frac{1}{2} i_a$.

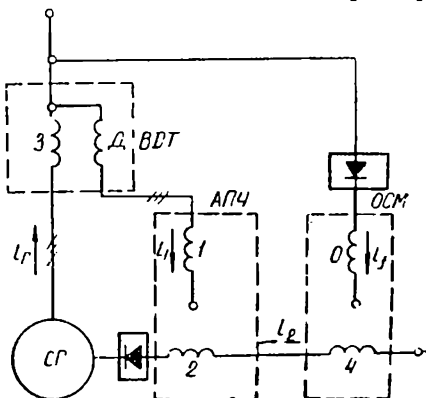


Рис. 1. Принципиальная схема каскадного асинхронно-синхронного возбудителя.

Схема включения системы каскадного возбуждения представлена на рис. 1. Рассмотрим режим работы возбудителя, когда ротор вращается навстречу полю статора асинхронного преобразователя частоты (АПЧ). Расположение осей обмоток возбудителя в пространстве с учетом вышесказанного имеет вид, изображенный на рис. 2.

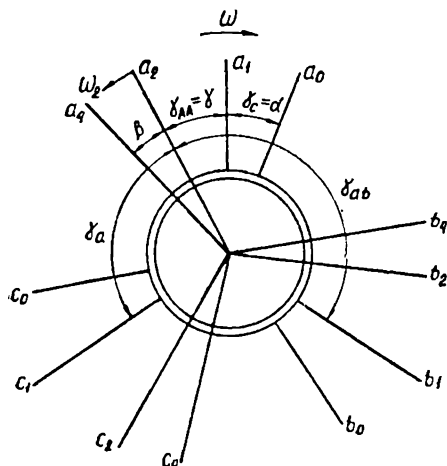


Рис. 2. Расположение осей обмоток возбудителя в пространстве.

На основании второго закона Кирхгофа уравнения каскадного возбудителя для мгновенных значений токов и напряжений в фазе запишутся

$$\left. \begin{aligned} u_{a1} &= D(\Psi_{a1} + \Psi_{a1}) + r_1 i_{a1}; \\ u_{a24} &= D(\Psi_{a2} + \Psi_{a4}) + r_{24} i_{a24}; \\ u_{a3} &= D\Psi_{a3} + r_3 i_{a3}; \\ u_{a0} &= D\Psi_{a0} + r_0 i_{a0}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi_{a1} &= L_{a1} i_{a1} + \sum_n^{b,c} M_{a1n1} i_{n1} + \sum_n^{a,b,c} M_{a1n2} i_{n2}; \\ \Psi_{a4} &= L_{a4} i_{a4} + \sum_n^{b,c} M_{a4n4} i_{n4} + \sum_n^{a,b,c} M_{a4n3} i_{n3}; \\ \Psi_{a2} &= L_{a2} i_{a2} + \sum_n^{b,c} M_{a2n2} i_{n2} + \sum_n^{a,b,c} M_{a2n1} i_{n1}; \\ \Psi_{a4} &= L_{a4} i_{a4} + \sum_n^{b,c} M_{a4n4} i_{n4} + \sum_n^{a,b,c} M_{a4n0} i_{n0}; \\ \Psi_{a3} &= L_{a3} i_{a3} + \sum_n^{b,c} M_{a3n3} i_{n3} + \sum_n^{a,b,c} M_{a3n4} i_{n4}; \\ \Psi_{a0} &= L_{a0} i_{a0} + \sum_n^{b,c} M_{a0n0} i_{n0} + \sum_n^{a,b,c} M_{a0n4} i_{n4}; \\ i_{n2} &= i_{n4}; \quad i_{n1} = i_{n4}. \end{aligned}$$

В общем случае коэффициенты взаимоиндукции между статорными и роторными обмотками являются функциями времени, их мгновенные значения определяются положением осей обмоток в пространстве. При вращении ротора результирующий угол γ

пространственного расположения осей одноименных фаз ротора и статора в геометрических градусах будет равен

$$\gamma = \gamma_0 + \int_0^t \omega_r dt, \quad (2)$$

где

$$\omega_r = \frac{\omega_c}{p_r} (1 + s).$$

Оси одноименных фаз статора и ротора в общем случае могут иметь свои начальные углы (см. рис. 2), которые можно определить аналитически.

Взаимоиндуктивности, зависящие от угла γ , являются гармоническими функциями времени. Поэтому система (1) является системой линейных уравнений с переменными коэффициентами. Преобразование уравнений с переменными коэффициентами в уравнения с постоянными коэффициентами достигается с помощью линейных преобразований [5, 6]. Каскадный асинхронно-синхронный возбудитель представляет собой симметричную в электрическом и магнитном отношении машину. Преобразования проведем методом симметричных составляющих [6] с помощью матрицы преобразования

$$\begin{vmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $a = e^{j \frac{2}{3} \pi}$.

После преобразования системы (1) методом симметричных составляющих получим для прямой последовательности

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha 11} &= D \left[(L_d - M_n + L_1 - M_1) i_{\alpha 11} + (M_r - M_n) i_{\alpha 31} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{2} M_{12} e^{-j\gamma_A} i_{\beta 21} \right] + r_1 i_{\alpha 11}; \\ u_{\alpha 31} &= D [(L_3 - M_n) i_{\alpha 31} + (M_r - M_n) i_{\alpha 11}] + r_3 i_{\alpha 31}; \\ -u_{\beta 21} &= D \left[(L_2 - M_2 + L_4 - M_4) i_{\beta 21} + \frac{3}{2} M_n e^{j\gamma_A} i_{\alpha 11} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{2} M_{04} e^{j\gamma_c} i_{\alpha 01} \right] + r_{24} i_{\beta 21}; \\ u_{\alpha 01} &= D \left[(L_0 - M_0) i_{\alpha 01} + \frac{3}{2} M_{04} e^{-j\gamma_c} i_{\beta 21} \right] + r_0 i_{\alpha 01}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь первые подстрочные индексы α и β означают принадлежность токов и напряжений соответственно к статору и ротору, второй подстрочный индекс — к номеру обмотки, третий —

к последовательности при анализе методом симметричных составляющих.

Например, $u_{\beta 21}$ — мгновенное значение напряжения прямой последовательности обмотки ротора. Из [6] известно, что если в симметричной системе определена прямая последовательность, то автоматически определена и обратная последовательность, которая будет отличаться только знаками при поворотных множителях. Поэтому в дальнейшем будем анализировать уравнения прямой последовательности, а подстрочный индекс 1, обозначающий уравнения прямой последовательности, будем опускать.

Обозначим

$$\begin{aligned}(L_d - M_n) &= L'_d; & \frac{3}{2} M_{12} &= M'_{12}; & (M_r - M_n) &= M'_n; \\ (L_1 - M_1) &= L_a; & \frac{3}{2} M_{04} &= M'_{04}; & (L_3 - M_3) &= L_{a3}; \\ (L_2 - M_2) &= L_{\beta A}; & (L_4 - M_4) &= L_{\beta 0}; & (L_0 - M_0) &= L_{a0}.\end{aligned}$$

Уравнения напряжений статора и ротора системы (4) записаны в координатах статора и ротора. Для совместного решения приведем уравнения к одним координатным осям. Домножим первое и второе уравнения системы (4) на поворачивающий множитель $e^{j\gamma_A}$, а четвертое уравнение — на $e^{j\gamma_c}$ и, применив теорему смещения

$$e^{\alpha t} [f(p) F(t)] = f(p - \alpha) e^{\alpha t} F(t),$$

получим систему уравнений (4) в виде

$$\left. \begin{aligned}u'_{a1} &= (D - jp_A \omega_r) [(L_d - L_a) i'_{a1} + M'_n L'_{a3} + M'_{12} i'_{\beta 2}] + r_1 i_{a1}; \\ u'_{a3} &= (D - jp_A \omega_r) (L_{a3} i'_{a3} + M'_n i'_{a1}) + r_3 i'_{a3}; \\ -u_{\beta 2} &= D [(L_{\beta A} + L_{\beta 0}) i_{\beta 2} + M'_{12} i'_{a1} + M'_{04} i'_{a0}] + r_{24} i_{\beta 2}; \\ u'_{a0} &= (D - jp_c \omega_r) (L_{a0} i_{a0} + M'_{04} i_{\beta 2}) + r_0 i_{a0}.\end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned}i_{a1} e^{j\gamma_A} &= i'_{a1}; & i_{a3} e^{j\gamma_A} &= i'_{a3}; & i_{a0} e^{j\gamma_c} &= i'_{a0}; \\ u_{a1} e^{j\gamma_A} &= u'_{a1}; & u_{a3} e^{j\gamma_A} &= u'_{a3}; & u_{a0} e^{j\gamma_c} &= u'_{a0}.\end{aligned}$$

После преобразования к осям ротора уравнения получаются аналогичными уравнениям для статических магнитосвязанных цепей. Эффект вращения обмоток относительно друг друга выражается в изменении оператора.

Приводя все параметры к обмотке ротора АПЧ и перейдя от индуктивностей к реактивным сопротивлениям, получим

$$\left. \begin{aligned} u'_1 &= (p - jn_a)(x_{s1a}i'_1 + x_m i'_0 + x_{\mu d} i'_{\mu d}) + r'_1 i'_1; \\ u''_3 &= (p - jn_a)(x_{s3}i''_3 + x_{\mu d} i'_{\mu d}) + r''_3 i''_3; \\ -u_2 &= p(x_{24}i_2 + x_m i'_0 + x_{\mu f} i'_{\mu f}) + r_{24}i_2; \\ u'_f &= (p - jn_0)(x_{\sigma 0}i'_f + x_{\mu f} i'_{\mu f}) + r'_0 i'_f, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$x_{s1a} = x_{s1} + x_{sa}; \quad x_{24} = x_{s2} + x_{s4}; \quad x_{\sigma 0} = x_{f0} + x_{\mu f};$$

$$\frac{\omega_r}{\omega_c} p_A = n_a; \quad \frac{\omega_r}{\omega_c} p_c = n_0; \quad p = \frac{d}{d(\omega t)}.$$

Заменяя токи намагничивающих контуров их составляющими и пренебрегая для упрощения активными сопротивлениями r'_1 ; r_{24} ; r''_3 , запишем систему уравнений (6)

$$\left. \begin{aligned} u'_1 &= x_{sa}(p - jn_a)i'_1 + x_m(p - jn_a)i_2 + x_{\mu d}(p - jn_a)i''_3; \\ -u_2 &= x_m p i'_1 + (x_2 + x_{\mu f}) p i_2 + x_{\mu f} p i'_f; \\ u''_3 &= x_{\mu d}(p - jn_a)i'_1 + x_3(p - jn_a)i''_3; \\ u'_f &= x_{\mu f}(p - jn_0)i_2 + [r_0 + x_f(p - jn_0)]i'_f. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь

$$\begin{aligned} x_{s1a} + x_{\mu d} + x_m &= x_{da}; \\ x_{24} + x_m + x_{\mu f} &= x_2 + x_{\mu f}; \\ x_{s3} + x_{\mu d} &= x_3; \\ x_{\sigma 0} + x_{\mu f} &= x_f. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (7) относительно выходного напряжения каскада u_2 , получим

$$u_2 = i_2 k_2 - u'_1 k_1 - u''_3 k_3 - u'_f k_4, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{1}{\left[\Psi - (\Psi - C_1) \frac{x_{\mu d}}{x_3} \right]} \cdot \frac{p}{p - jn_a}; \\ k_3 &= \frac{1}{\left[\left(\frac{x_3}{x_{\mu d}} - 1 \right) \Psi + C_1 \right]} \cdot \frac{p}{p - jn_a}; \end{aligned}$$

$$k_4 = - \frac{x_{\mu f} p T_f}{x_f [1 + T_f (p - j n_0)]};$$

$$k_2 = (x_2 + x_{\mu f}) p + k_4 x_{\mu f} (p - j n_0) + x_m k_1 (p - j n_a);$$

$$\Psi = \frac{x_{\mu d}}{x_m} + C_1; \quad C_1 = \frac{x_1 + x_{1s} + x_m}{x_m}; \quad T_f = \frac{\omega L_f}{r_f}.$$

Обозначив

$$-u'_1 k - u''_3 k_3 - u'_f k_4 = -E_{\text{ЭКВ}},$$

получим

$$u_2 = E_{\text{ЭКВ}} - i_2 k_2, \quad (9)$$

принимая во внимание, что

$$u_3 = u_1 - u_r,$$

напишем выражения для эквивалентной э. д. с.

$$E_{\text{ЭКВ}} = -u'_1 (k_1 - k_3) + u_r k_3 - u'_f k_4.$$

Уравнение (9) представляет собой уравнение переходного процесса, которому соответствует расчетная схема замещения, представленная на рис. 3, где $x_a = k_2$. Величина эквивалентной э. д. с. $E_{\text{ЭКВ}}$ есть сумма напряжений, учитывающая воздействие машин, входящих в каскад.

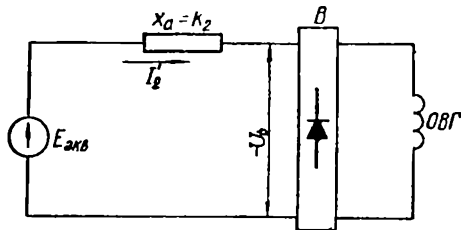


Рис. 3. Упрощенная схема замещения возбудительного устройства.

Как видно из вышеизложенного, сложная система возбуждения (см. рис. 1) приводится к простой схеме замещения (см. рис. 3), где источник э. д. с. $E_{\text{ЭКВ}}$ работает через выпрямительный мост

на активно-индуктивную нагрузку с предвключенным анодным сопротивлением x_a . Для исследования переходных процессов в такой схеме можно воспользоваться методом [3], базирующимся на использовании статических внешних характеристик работы выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку, определенных в установившихся режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы самовозбуждения с полупроводниковыми выпрямителями для турбо- и гидрогенераторов в практике зарубежного электромашиностроения. Электротехническая промышленность за рубежом. Под ред. И. А. Глебова. М., Информэлектро, 1963.

2. Применение выпрямителей для возбуждения синхронных генераторов. Электротехническая промышленность за рубежом. Под ред. И. А. Глебова. М., Информэлектро, 1963.

3. И. А. Глебов. Системы возбуждения синхронных машин с управляемыми преобразователями. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1960.

4. А. Т. Пластун, Н. С. Сиунов. Бесщеточная система возбуждения синхронных машин с каскадным асинхронно-синхронным возбудителем. «Электричество», 1970, № 9.

5. А. И. Важнов. Основы теории переходных процессов синхронных машин. М. — Л., ГЭИ, 1960.

6. А. А. Янко-Триницкий. Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решение. «Электричество», 1951, № 3.

7. В. Лайон. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока методом симметричных составляющих. Пер. с англ. М., ГЭИ, 1958.
